

基于直接算法的合成孔径雷达干涉测量几何精度分析*

常本义,王雅楠

(西安测绘研究所,陕西 西安 710054)

摘 要:直接将绝对相位差引入距离方程和多普勒方程求解地面点坐标,称为合成孔径雷达干涉测量直接算法。利用引入含有合理误差的模拟 InSAR 像坐标、绝对相位差和相应的轨道参数作为起算数据,求得含有误差的地面点坐标,实现了 InSAR 直接算法的几何精度分析。为了把基线长度和姿态的误差引入轨道空间位置,提出了相应的数学模型。计算结果表明,直接算法与经典算法精度基本相同。

关键词:合成孔径雷达干涉测量直接算法;距离方程;多普勒方程

中图分类号:P237 **文献标识码:**B

The Analysis of Geometric Accuracy of the Interferometric Synthetic Aperture Radar Measuring Based on Direct Algorithm

CHANG Ben-yi, WANG Ya-nan

(Xi'an Research Institute of Surveying and mapping, Xi'an 710054, China)

Abstract: The direct algorithm of interferometric synthetic aperture radar measuring is to directly introduce the absolute phase difference into range equation and Doppler equation to resolve the ground coordinates. By using the ideal image coordinate, absolute phase difference and orbital position of InSAR which include reasonable errors as the initial data, we can get the ground coordinates which include the errors and realize the analysis of geometric accuracy of the ground coordinates. In order to introduce the errors of the baseline length and attitude into orbital position, we propose the corresponding mathematical model. The computation results show that the accuracy of direct algorithm is almost the same as that of the classical algorithm.

Key words: direct algorithm of interferometric synthetic aperture radar measuring; range equation; doppler equation

InSAR 处理的经典算法是基于双天线的干涉测量模式。此时,天线距是固定的,两天线相对姿态也是固定的,雷达站坐标也是唯一的,所以,采用经典算法比较简单。当干涉测量模式为重复轨道模式时,两天线距和姿态随时间变化而变化,此时采用经典算法就比较复杂。因此,一种基于距离条件和多普勒条件的 InSAR 直接算法应运而生,即 Mora 等人首先应用的 InSAR 直接算法^[1]。以该算法为基础,用与经典法几何精度分析相同的起算数据^[2,3],进行 InSAR 处理,以达到严格检验 InSAR 直接算法的目的;同时也弄清使用 InSAR 直接算法所必需的条件。

1 InSAR 直接算法

根据 Mora 提出的新方法^[1],在已知轨道参数和完成绝对相位差解算的条件下,可以直接利用以下方程直接确定地面点的空间坐标:

* 收稿日期:2005-01-08

基金项目:国家 863 计划资助项目(2003X02206-2)

作者简介:常本义(1937-),男,研究员,博士生导师。

$$\begin{cases} f_1 = (X_{s_1} - X)^2 + (Y_{s_1} - Y)^2 + (Z_{s_1} - Z)^2 - R_1^2 = 0 \\ f_2 = (X_{s_2} - X)^2 + (Y_{s_2} - Y)^2 + (Z_{s_2} - Z)^2 - (R_1 + \frac{\lambda\Phi}{4\pi})^2 = 0 \\ f_3 = \dot{X}_{s_1}(X_{s_1} - X) + \dot{Y}_{s_1}(Y_{s_1} - Y) + \dot{Z}_{s_1}(Z_{s_1} - Z) = 0 \\ f_4 = (X_{s_2} - X)^2 + (Y_{s_1} - Y)^2 + (Z_{s_1} - Z)^2 - (R_2 - \frac{\lambda\Phi}{4\pi})^2 = 0 \\ f_5 = (X_{s_2} - X)^2 + (Y_{s_2} - Y)^2 + (Z_{s_2} - Z)^2 - R_2^2 = 0 \\ f_6 = \dot{X}_{s_2}(X_{s_2} - X) + \dot{Y}_{s_2}(Y_{s_2} - Y) + \dot{Z}_{s_2}(Z_{s_2} - Z) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

需要说明的是:(1)式中后三个条件是我们加上的,配对的雷达站参数和测距观测值不用是不合理的。

这种直接变换算法既不需处理平地效应,也不需在斜距投影下进行相位到高程的计算,而且同时求得地面点三维坐标。但是,与经典法相比,新方法中基线长度和指向未作为独立的观测量出现在公式中,因此,必须提出一套数学模型和方法把基线长度和指向观测值引入新方法中。

1.1 基线长度观测值引入雷达站坐标的方法

基线长度在 InSAR 直接算法中以下列方式引入雷达站坐标。

求两雷达站连线中点坐标:

$$\begin{cases} X_s = (X_{s_1} + X_{s_2})/2 \\ Y_s = (Y_{s_1} + Y_{s_2})/2 \\ Z_s = (Z_{s_1} + Z_{s_2})/2 \end{cases} \quad (2)$$

设原基线长度为 B ,引入基线长度观测值 b ,新的雷达站坐标记为 U 、 V 、 W :

$$\begin{cases} U_{s_1} = X_s - (X_{s_1} - X_s) \times b/B \\ V_{s_1} = Y_s - (Y_{s_1} - Y_s) \times b/B \\ W_{s_1} = Z_s - (Z_{s_1} - Z_s) \times b/B \\ U_{s_2} = X_s - (X_{s_2} - X_s) \times b/B \\ V_{s_2} = Y_s - (Y_{s_2} - Y_s) \times b/B \\ W_{s_2} = Z_s - (Z_{s_2} - Z_s) \times b/B \end{cases} \quad (3)$$

1.2 基线姿态观测值引入雷达站坐标的方法

根据(2)式求两雷达站连线中点坐标。

基线仰角的定义:

$$\tan\alpha = (Z_{s_1} - Z_{s_2}) / \sqrt{(X_{s_1} - X_{s_2})^2 + (Y_{s_1} - Y_{s_2})^2} \quad (4)$$

$$Z'_{s_1} = Z_{s_2} + \tan\alpha \cdot \sqrt{(X_{s_1} - X_{s_2})^2 + (Y_{s_1} - Y_{s_2})^2} \quad (5)$$

$$B = \sqrt{(X_{s_1} - X_{s_2})^2 + (Y_{s_1} - Y_{s_2})^2 + (Z_{s_1} - Z_{s_2})^2} \quad (6)$$

$$b = \sqrt{(X_{s_1} - X_{s_2})^2 + (Y_{s_1} - Y_{s_2})^2 + (Z'_{s_1} - Z_{s_2})^2} \quad (7)$$

根据(2)、(3)式求得经基线仰角约束条件改正后的两雷达站坐标。

2 InSAR 直接算法条件下几何精度试验

InSAR 中影响地面点几何精度的因素,主要有轨道误差、测距误差、基线误差、相位差误差等,基线误差包括基线长度误差和基线姿态误差。试验采用理想干涉测量数据^[2]。

2.1 各单项因素对 InSAR 几何精度影响的试验

2.1.1 基线长度误差对地面点精度的影响

用模拟数据^[2]根据直接算法(1)式计算了基线长度误差分别为 $\pm 0.1\text{m}$ 、 $\pm 0.05\text{m}$ 、 $\pm 0.03\text{m}$ 等六种情况,结果见表 1。基线误差用(2)、(3)式引入雷达站坐标。

表 1 根据直接算法计算的基线长度误差对地面点精度的影响(m)

Tab.1 Effect of geometric accuracy caused by baseline length error based on direct algorithm

基线长度误差	0.1	-0.1	0.05	-0.05	0.03	-0.03
X 方向中误差	2.51	2.51	1.30	1.30	0.76	0.76
Z 方向中误差	1.51	1.51	0.78	0.78	0.46	0.46

上述计算结果表明,基线长度误差对地面点几何精度的影响:平面为 $\pm 0.76\text{m} \sim \pm 2.51\text{m}$; 高程为 $\pm 0.46\text{m} \sim \pm 1.51\text{m}$; 直接算法略优于经典法^[2]。

2.1.2 基线姿态误差对地面点精度的影响

用模拟数据^[2]根据直接算法(1)式计算了基线姿态误差分别为 $\pm 18''$ 、 $\pm 9''$ 、 $\pm 5''$ 等六种情况,结果见表 2。

表 2 根据直接算法计算的基线姿态误差对地面点精度的影响(m)

Tab.2 Effect of geometric accuracy caused by baseline attitude error based on direct algorithm

基线姿态误差	18"	-18"	9"	-9"	5"	-5"
X 方向中误差	43.65	43.65	21.82	21.82	12.12	12.12
Z 方向中误差	25.26	25.26	12.63	12.63	7.02	7.02

上述计算结果表明,基线姿态误差对地面点几何精度的影响:平面为 $\pm 12\text{m} \sim \pm 43\text{m}$; 高程为 $\pm 7\text{m} \sim \pm 25\text{m}$; 直接算法与经典法效果基本相同^[2]。

2.1.3 绝对相位差误差对地面点精度的影响

用模拟数据^[2]根据直接算法(1)式计算了绝对相位差误差分别为 $\pm 1\text{rad}$ 、 $\pm 0.52\text{rad}$ 、 $\pm 0.3\text{rad}$ 等六种情况,结果见表 3。

表 3 根据直接算法计算的绝对相位差误差对地面点精度的影响(m)

Tab.3 Effect of geometric accuracy caused by absolute phase difference error based on direct algorithm

绝对相位差误差	1rad	-1rad	0.45rad	-0.45rad	0.3rad	-0.3rad
X 方向中误差	1.32	1.32	0.69	0.69	0.40	0.40
Z 方向中误差	0.77	0.77	0.40	0.40	0.23	0.23

上述计算结果表明,绝对相位差误差对地面点几何精度的影响:平面为 $\pm 0.4\text{m} \sim \pm 1.3\text{m}$; 高程为 $\pm 0.2\text{m} \sim \pm 0.77\text{m}$; 直接算法与经典法效果基本相同^[2]。

2.1.4 测距(距离向)误差对地面点精度的影响

用模拟数据^[2]根据直接算法(1)式计算了测距(距离向)误差分别为 $\pm 2.5\text{m}$ 、 $\pm 1\text{m}$ 、 $\pm 0.5\text{m}$ 等六种情况,结果见表 4。

表 4 根据直接算法计算的测距(距离向)误差对地面点精度的影响(m)

Tab.4 Effect of geometric accuracy caused by distance measurement error based on direct algorithm

测距误差	2.5	-2.5	1	-1	0.5	-0.5
X 方向中误差	1.25	1.25	0.50	0.50	0.25	0.25
Z 方向中误差	2.16	2.16	0.87	0.87	0.43	0.43

上述计算结果表明,测距(距离向)误差对地面点几何精度的影响:平面为 $\pm 0.25\text{m} \sim \pm 1.25\text{m}$; 高程为 $\pm 0.43\text{m} \sim \pm 2.16\text{m}$; 直接算法与经典法效果基本相同^[2]。

2.1.5 雷达站坐标误差对地面点精度的影响

用模拟数据^[2]根据直接算法(1)式计算了雷达站坐标误差分别为 $\pm 1\text{m}$ 等两种情况,结果见表5。

表5 根据直接算法计算的雷达站坐标误差对地面点精度的影响(m)

Tab.5 Effect of geometric accuracy caused by radar station coordinates error based on direct algorithm

雷达站坐标误差	1	-1
X方向中误差	1.00	-1.00
Z方向中误差	1.00	-1.00

上述计算结果表明,雷达站坐标误差对地面点几何精度的影响:平面为 $\pm 1\text{m}$;高程为 $\pm 1\text{m}$;直接算法与经典法效果基本相同^[2]。

总结起来,各单项因素对地面点坐标精度的影响大小按次序排列为:基线姿态误差,基线长度,雷达站坐标误差,绝对相位误差与测距误差。

与经典算法相比,直接算法略微占优。

2.2 基线长度、基线姿态、绝对相位差、距离和雷达站坐标误差对地面点精度的综合影响

左、右雷达站坐标、基线长度和姿态共有375个数据,分别给予平均中误差为 $\pm 1\text{m}$ 、 $\pm 0.04\text{m}$ 、 $\pm 9''$ 的一组随机误差^[2]。绝对相位差和测距值全试验区共有 (375×474) 个数据,给予平均中误差为 $\pm 0.52\text{rad}$ 和 $\pm 1.5\text{m}$ 的一组随机误差^[2]。

由于直接算法无基线长度和姿态观测值,必需用(2)、(3)、(4)、(5)式将其影响引入左、右雷达站坐标,表6即为经基线条件制约后,左、右雷达站坐标的误差统计。

表6 经基线制约的左右雷达站坐标误差

Tab.6 Left and right radar station coordinates error restricted by baseline

范围(m)	X_{sl} (个)	Z_{sl} (个)	X_{sr} (个)	Z_{sr} (个)
> 1	19	70	16	13
1~0.5	54	56	57	60
0.5~0.0	117	68	123	116
0.0~-0.5	105	57	95	108
-0.5~-1	66	55	68	64
< -1	14	69	16	14
中误差	0.56	0.57	0.55	0.56

与经典算法相比^[2],雷达站坐标的精度从 $\pm 1\text{m}$ 提高到 $\pm 0.8\text{m}$,换句话说,精度 $\pm 0.04\text{m}$ 基线长度观测值与 $\pm 9''$ 基线指向观测值对于雷达站坐标精度的贡献是提高20%。根据引入的雷达站坐标误差和绝对相位和测距误差^[2],用直接算法计算了InSAR地面点坐标,并据此统计了几何精度列入表7。

表7 根据新方法计算的地面点坐标误差统计

Tab.7 Statistics of geometric coordinates error based on new algorithm

范围(m)	X 方向误差(个)	范围(m)	Z 方向误差(个)
> 40	9624	> 30	12550
40 ~ 30	6076	30 ~ 20	17511
30 ~ 15	18482	20 ~ 10	22456
15 ~ 0	48564	10 ~ 0	30514
0 ~ - 15	51180	0 ~ - 10	31963
- 15 ~ - 30	28033	- 10 ~ - 20	26374
- 30 ~ - 40	7252	- 20 ~ - 30	24413
< - 40	8539	< - 30	11969
中误差	21.56	中误差	12.61

计算结果表明,平面和高程的中误差经典法^[2]与直接算法(表6)基本相同,即在测距中误差为 $\pm 1.5\text{m}$,轨道定位精度为 $\pm 1\text{m}$,相位中误差为 $\pm 0.45\text{rad}$,基线的姿态角测量中误差优于 $\pm 9''$,基线的长度测量中误差为 $\pm 0.04\text{m}$ 的条件下,基于直接算法的 InSAR 系统亦可达到绝对平面精度 $\pm 21.56\text{m}$,绝对高程精度 $\pm 12.61\text{m}$ 的要求。

3 结 论

(1) 试验证明,基于直接算法的合成孔径雷达干涉测量方法是正确的,且精度略微优于经典方法,在重复轨道的模式下,更加方便和简单。

(2) 在直接算法计算中,本文提出的把基线长度和姿态误差引入左右雷达站坐标的方法是正确的。

(3) 众所周知,影响星载 InSAR 系统几何精度最关键的因素是星间基线姿态测量误差,建立在精确的雷达站坐标已知基础上的直接算法,完全不需引入基线长度与基线姿态观测值,从而避开了研发难度极大的、精度要求极高的星间基线测量系统,为基于小卫星编队的星载 InSAR 系统的研制提供了一种可供考虑的技术途径。

参 考 文 献:

- [1] Bara M, Mora O, Romero M, et al. Generation of Precise Wide-Area Geocoded Elevation Models with ERS SAR Data[J]. IGARSS'99, 0 - 7803 - 5207 - 6/99, 1999 IEEE.
- [2] 常本义,王雅楠. 星载合成孔径雷达干涉测量几何精度的数字仿真[J]. 测绘科学与工程,2005,(1):29 - 33.
- [3] 刘建平,梁甸农,何峰. 主星带伴随微小卫星编队 SAR 系统的空间分辨率分析[J]. 国防科技大学学报,2004,26(3).

